

---

# Estudio de la capacidad del canal en enlaces ópticos atmosféricos modelados con distribución

---

J.M. Garrido Balsells, A. Jurado Navas, J. Paris Ángel,  
M. del Castillo Vázquez y A. Puerta Notario

*Departamento de Ingeniería de Comunicaciones  
E.T.S.I. Telecomunicación. Universidad de Málaga  
Campus Universitario de Teatinos, E-29071 Málaga  
Phone +34 952134166 Fax. +34 952132027  
E-mail: [jgarrido@ic.uma.es](mailto:jgarrido@ic.uma.es)*



*ingeniería de comunicaciones  
universidad de Málaga*



# Contenido

1. Introducción
2. Modelo de distribución  $\mathcal{M}$
3. Capacidad del canal y Probabilidad de bloqueo
4. Conclusiones



# 1. Introducción

## COMUNICACIONES ÓPTICAS ATMOSFÉRICAS



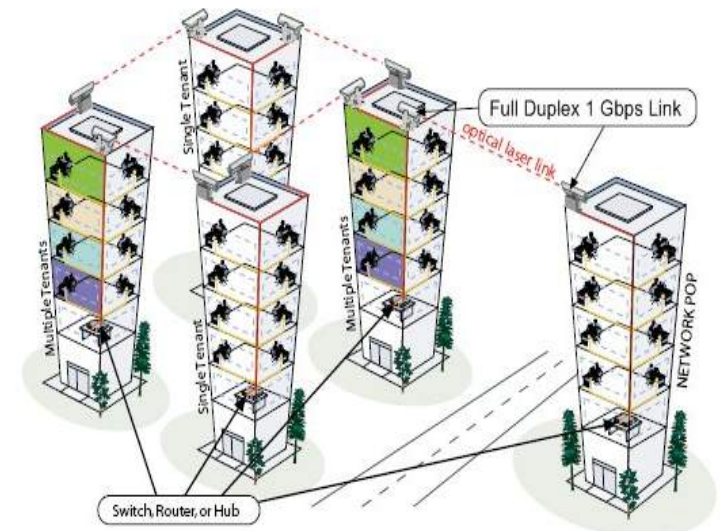
Alternativa sistemas Radio

Complemento a sistemas  
ópticos guiados

Gran BW potencial sin regulación  
Facilidad de diseño de red  
Bajo coste

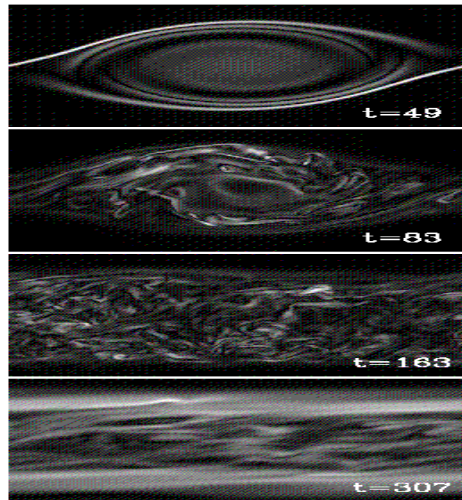
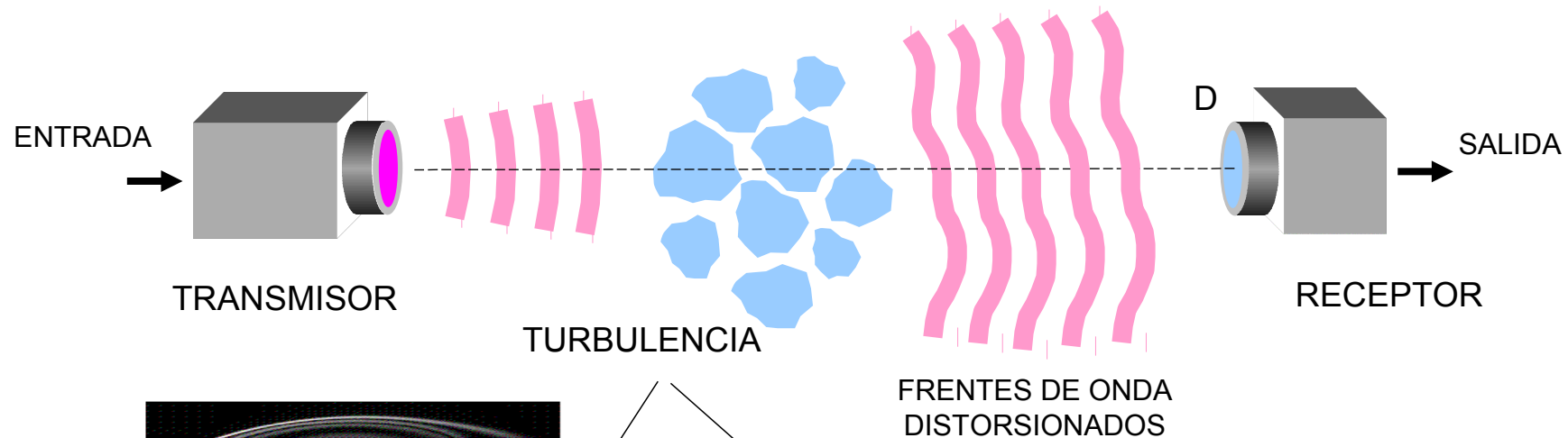
Sistemas Todo-Ópticos  
de nueva generación

- Enlaces terrestres entre edificios
- Enlaces terrestres con vehículos móviles
- Sistemas satélite-tierra



# 1. Introducción

## Canal óptico atmosférico

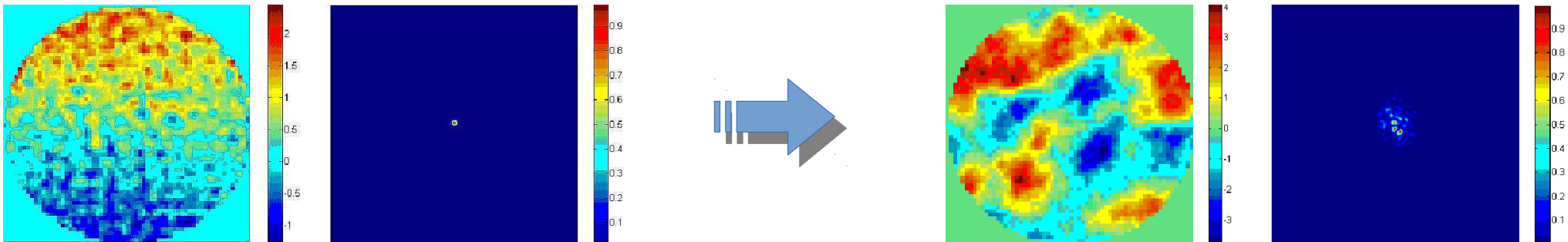
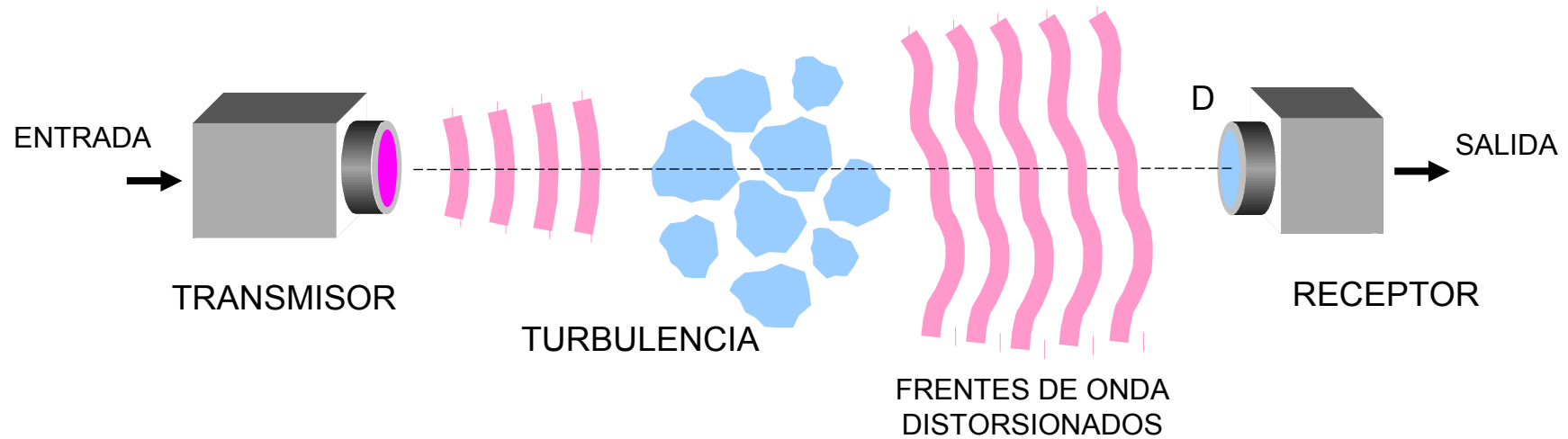


Variaciones aleatorias del índice de refracción en el trayecto Tx-Rx



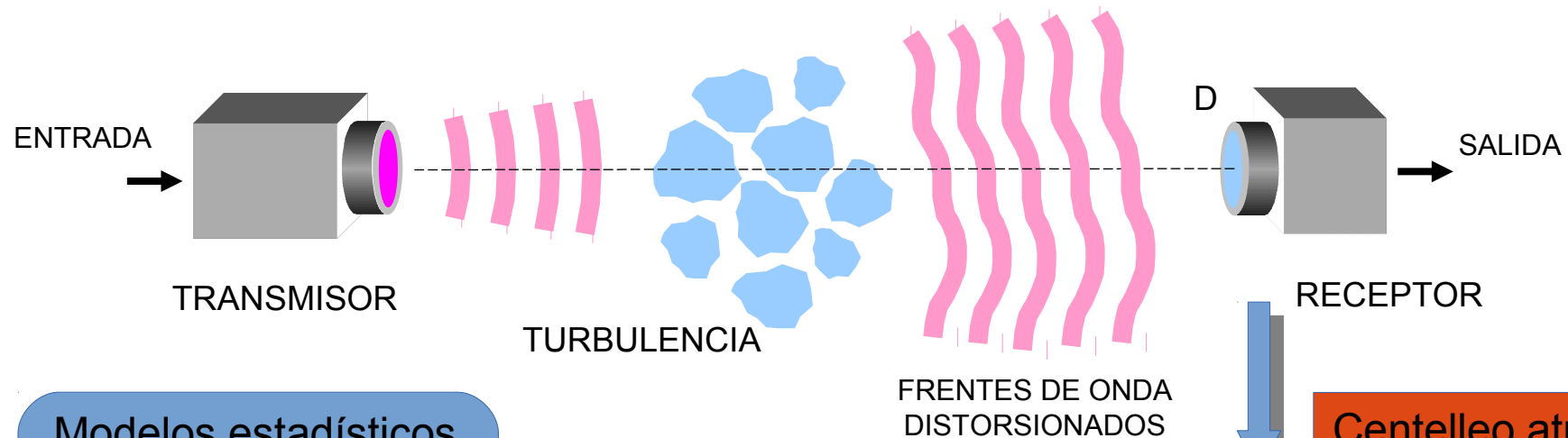
# 1. Introducción

## Canal óptico atmosférico



# 1. Introducción

## Canal óptico atmosférico



Modelos estadísticos de probabilidad para la predicción de la irradiancia recibida

Log-normal, Gamma-Gamma, Málaga ( $\mathcal{M}$ )

Índice de centelleo:  $\sigma_I^2$

DESVANECIMIENTOS ALEATORIOS EN IRRADIANCIA RECIBIDA

$$I_{rx} = I_0 I$$

Efecto multiplicativo



## 2. Modelo de distribución $\mathcal{M}$

### Características del modelo Málaga o $\mathcal{M}$ :

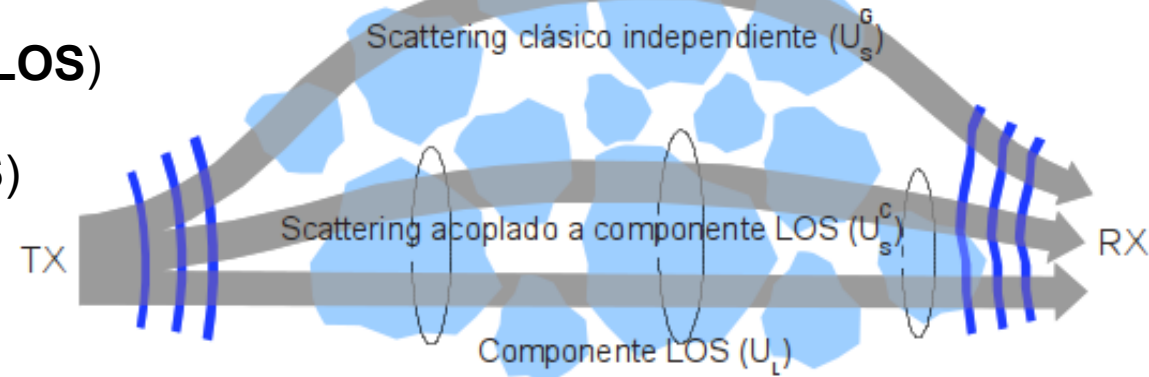
$U_L$  : Señal óptica línea de visión directa (**LOS**)

$U_S^G$  : Señal *scattering* clásico (**indep. LOS**)

$U_S^C$  : Señal *scattering* **acoplado a LOS**

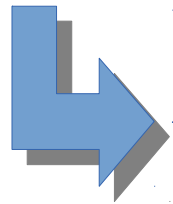
$\Omega = E[|U_L|^2]$  Potencia óptica promedio de la componente LOS

$\xi = E[|U_S^C|^2 + |U_S^G|^2]$  Potencia media de las dos componentes de *scattering*



$\rho$

$$0 \leq \rho \leq 1$$



$$\xi_c = \rho \xi$$

Potencia *scattering* acoplado a señal LOS

$$\xi_g = (1 - \rho) \xi$$

Potencia *scattering* independiente de señal LOS



## 2. Modelo de distribución $\mathcal{M}$

Función densidad de probabilidad  $f_I(I)$ :  $[\alpha, \beta, \Omega']$

$$\beta \in \mathbb{N}$$

$$f_I(I) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left( 2\sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\xi_g \beta + \Omega'}} \right) \left\{ \begin{array}{l} A \triangleq \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\xi_g^{1+\frac{\alpha}{2}} \Gamma(\alpha)} \left( \frac{\xi_g \beta}{\xi_g \beta + \Omega'} \right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}} \\ a_k \triangleq \binom{\beta-1}{k-1} \frac{(\xi_g \beta + \Omega')^{1-\frac{k}{2}}}{\Gamma(k)} \left( \frac{\Omega'}{\xi_g} \right)^{k-1} \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}} \end{array} \right.$$

$$\beta \in \mathbb{R}$$

$$f_I(I) = A^{(G)} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^{(G)} I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left( 2\sqrt{\frac{\alpha I}{\xi_g}} \right) \left\{ \begin{array}{l} A^{(G)} \triangleq \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\xi_g^{1+\frac{\alpha}{2}} \Gamma(\alpha)} \left( \frac{\xi_g \beta}{\xi_g \beta + \Omega'} \right)^{\beta} \\ a_k^{(G)} \triangleq \frac{(\beta)_{k-1} (\alpha \xi_g)^{\frac{k}{2}}}{[(k-1)!]^2 \xi_g^{k-1} (\Omega' + \xi_g \beta)^{k-1}} \end{array} \right.$$





### 3. Capacidad del canal y probabilidad de bloqueo

Capacidad del canal:

$$C(I) = \log_2(1 + \underbrace{\gamma_0 I^2}_{\text{SNR}})$$

v.a.

$$\gamma = \frac{(RI_0 I)^2}{\sigma_n^2} = \gamma_0 I^2$$

Capacidad  
ergódica

$$C_{erg} = E[C(I)] = \int_0^\infty \log_2(1 + \gamma_0 I^2) \underbrace{f_I(I)}_{\text{fdp distribución } \mathcal{M}} dI$$

fdp distribución  $\mathcal{M}$

Promedio de todos los posibles efectos del canal en el trayecto Tx-Rx

$$C_{erg} = \begin{cases} \frac{A\alpha (2\sqrt{B})^\alpha}{2\pi \ln(2)} \sum_{k=1}^{\beta} \binom{\beta-1}{k-1} \frac{2^k}{\Gamma(k)} \left(\frac{\Omega'}{\xi_g \beta}\right)^{k-1} G_{6,2}^{1,6} \left( 16B^2 \gamma_0 \left| \begin{matrix} 1, 1, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, \frac{2-k}{2} \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right) & \beta \in \mathbb{N} \\ \frac{A^{(G)}}{8\pi \ln(2)} \left(\frac{4\xi_g}{\alpha}\right)^{\frac{\alpha}{2}} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^{(G)} \left(\frac{4\xi_g}{\alpha}\right)^{\frac{k}{2}} G_{6,2}^{1,6} \left( \frac{4\xi_g}{\alpha} \gamma_0 \left| \begin{matrix} 1, 1, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, \frac{2-k}{2} \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right) & \beta \in \mathbb{R} \end{cases}$$

$\rho$

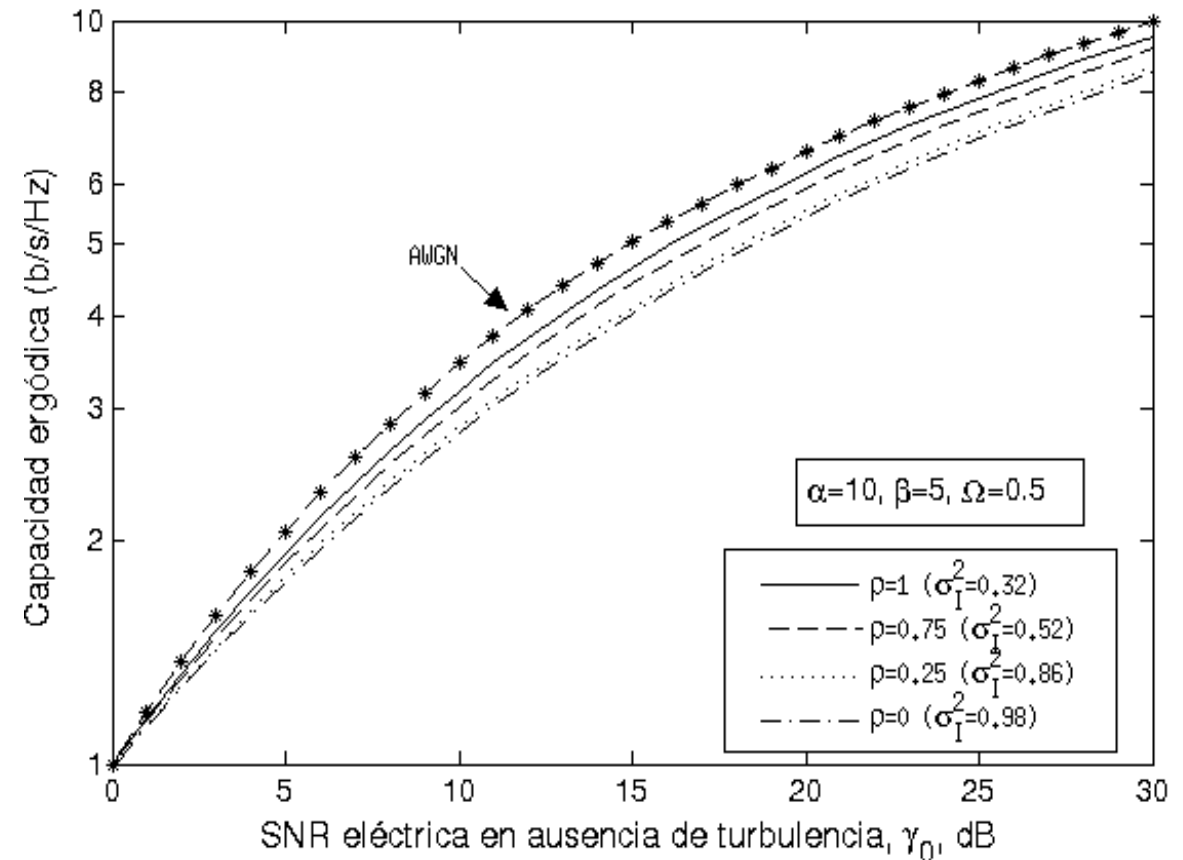


# 3. Capacidad del canal y probabilidad de bloqueo

## Capacidad del canal:

Resultados:

- ✓ Especial relevancia del parámetro  $\rho$  (dependencia directa con intensidad de turbulencia)
- ✓ Turbulencia débil ( $\rho=1$ ): Capacidad ergódica ligeramente inferior a canal ideal AWGN
- ✓ Turbulencia fuerte ( $\rho=0$ ): Reducción de la capacidad del 12% respecto a  $\rho=1$ .



### 3. Capacidad del canal y probabilidad de bloqueo

Probabilidad de bloqueo:

$$P_{out} = \Pr [\gamma \leq \gamma_{th}] = \Pr [P_b \geq P_{b,th}]$$

SNR umbral (Prob. error objetivo)

$$P_{out} = \Pr \left[ I \leq \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{\gamma_0}} \right] = \Pr \left[ I \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_n}} \right] = F_I \left[ \frac{1}{\sqrt{\gamma_n}} \right]$$

$$\gamma_n = \frac{\gamma_0}{\gamma_{th}}$$

CDF distribución  $\mathcal{M}$

CANAL ATMOSFÉRICO:  
MODELO DE DESVANECIMIENTOS LENTOS

$$P_{out} = \begin{cases} A \sum_{k=1}^{\beta} a_k (\sqrt{\gamma_n})^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{1,3}^{2,1} \left( \frac{1}{B\sqrt{\gamma_n}} \middle| \frac{\alpha-k}{2}, -\frac{\alpha-k}{2}, -\frac{\alpha+k}{2} \right) & \beta \in \mathbb{N} \\ A^{(G)} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^{(G)} (\sqrt{\gamma_n})^{-\frac{\alpha+k}{2}} G_{1,3}^{2,1} \left( \frac{\alpha}{\xi_g \sqrt{\gamma_n}} \middle| \frac{\alpha-k}{2}, -\frac{\alpha-k}{2}, -\frac{\alpha+k}{2} \right) & \beta \in \mathbb{R} \end{cases}$$

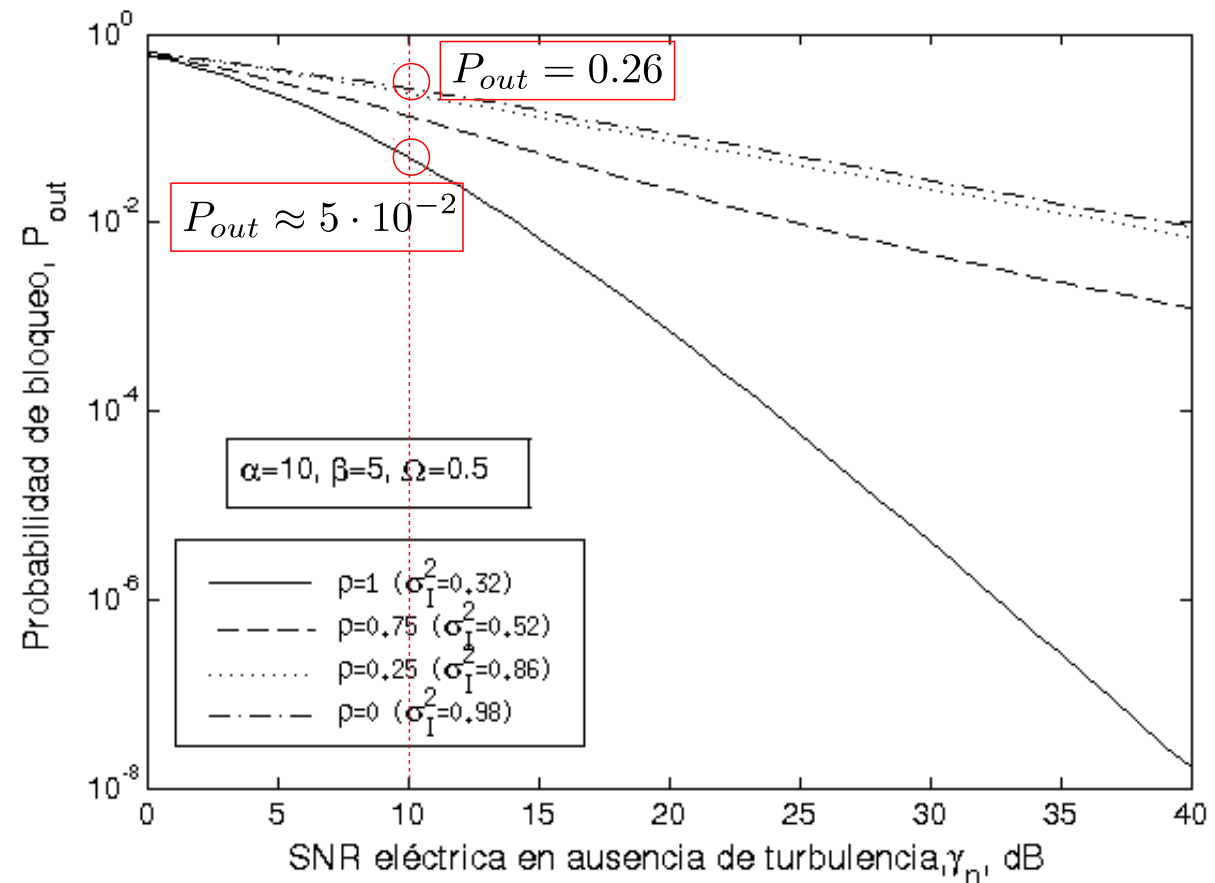


### 3. Capacidad del canal y probabilidad de bloqueo

#### Probabilidad de bloqueo:

##### Resultados:

- ✓ Efecto clarísimo del parámetro  $\rho$  en la probabilidad de bloqueo del enlace óptico.
- ✓ Turbulencia débil ( $\rho=1$ ): para SNR normalizada de 10dB ( $\gamma_0 = \gamma_{th} + 10$  dB) calidad se alcanza el 95% del tiempo.
- ✓ Turbulencia fuerte ( $\rho=0$ ): La calidad objetivo se cumpliría solo el 74% del tiempo.



## 4. Conclusiones

- Se ha presentado un análisis de parámetros clásicos del canal óptico atmosférico asumiendo que el centelleo atmosférico está modelado mediante la distribución Málaga o  $\mathcal{M}$ .
- Se han deducido expresiones matemáticas cerradas de la capacidad ergódica y de la probabilidad de bloqueo que permiten estimar las prestaciones de canales ópticos atmosféricos sometidos a cualquier grado de turbulencia.
- Se ha verificado la relevancia del parámetro  $\rho$ , característico del modelo de distribución  $\mathcal{M}$ , calculando su influencia en la intensidad de la turbulencia y en las prestaciones de los enlaces a partir de las expresiones anteriores.



---

# Estudio de la capacidad del canal en enlaces ópticos atmosféricos modelados con distribución

---

J.M. Garrido Balsells, A. Jurado Navas, J. Paris Ángel,  
M. del Castillo Vázquez y A. Puerta Notario

*Departamento de Ingeniería de Comunicaciones  
E.T.S.I. Telecomunicación. Universidad de Málaga  
Campus Universitario de Teatinos, E-29071 Málaga  
Phone +34 952134166 Fax. +34 952132027  
E-mail: [jgarrido@ic.uma.es](mailto:jgarrido@ic.uma.es)*



*ingeniería de comunicaciones  
universidad de Málaga*

